

COMPENSADORES ESTÁTICOS DE POTENCIA: VISIÓN GENERAL Y REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS

Ingeniera electrónica, M.Sc(c)

Grupo de Investigación GISEL

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

mmantilla@ieee.org

JOHANN FARITH PETIT SUÁREZ

Ingeniero electricista, Ph.D.

Profesor Asociado

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Universidad Industrial de Santander

jfpetit@uis.edu.co

Fecha de Recibido: 01/09/2009

Fecha de Aprobación: 26/05/2010

RESUMEN

En este artículo se presenta una revisión del estado del arte del Compensador Estático de Potencia utilizado para el mejoramiento de la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución. Se expone el principio de operación de este dispositivo, sus modos básicos de operación, las opciones de compensación que éste dispositivo ofrece, la estructura del convertidor de potencia y las principales tendencias con respecto a sus estrategias de control (obtención de las señales de referencia, control del convertidor de potencia y del bus de continua). Se enfatiza en el estado del arte de las estrategias de control debido al amplio trabajo desarrollado en este campo y al importante rol que juegan estas estrategias en el rendimiento del compensador.

PALABRAS CLAVE: Calidad de la energía eléctrica, *Custom Power Devices*, Compensador Estático de Potencia para Sistemas de Distribución.

ABSTRACT

This paper shows a state-of-the-art review on the Distribution Static Compensators used for the power quality improvement in distribution systems. The review includes: the operation principle, its basic operation modes, its compensation options, the power converter structure and the main trends of its control strategies (generation of the reference signals, power converter control and DC storage device control). The control strategies are emphasized due to the extensive research on this field and their key role in the compensator performance.

KEYWORDS: Power quality, Custom Power Devices, Distribution Static Compensator (DSTATCOM).

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha evidenciado un aumento considerable de las perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución, debido a la masiva utilización de cargas no lineales y al incremento del número de equipos utilizados en los hogares, en el comercio y en las industrias. Además, estas cargas y equipos

electrónicos cada vez son más sensibles a las perturbaciones presentes en la red de suministro, por lo que una deficiente calidad de la energía puede traer consigo grandes pérdidas económicas y técnicas, tanto para el sector eléctrico como para los usuarios finales del sistema. Esta situación ha conllevado, a que sea de vital importancia mantener un nivel de calidad de energía adecuado y una alta confiabilidad de suministro de electricidad [1].

Con el fin de compensar estas perturbaciones que afectan la calidad de la energía, se han desarrollado diferentes soluciones, entre las cuales se encuentran: los filtros pasivos [2], los filtros activos de potencia [3],[4], los filtros híbridos [5] y los *Custom Power Devices* [1], [6], [7]. Este trabajo se enmarca dentro de ésta última tendencia, más precisamente en uno de los dispositivos *Custom Power* de tipo compensación, conocido con el nombre de Compensador Estático de Potencia para sistemas de distribución (DSTATCOM, *Distribution Static Compensator*).

En concreto, el DSTATCOM ofrece soluciones integrales a los problemas relacionados con la calidad de la energía en los sistemas de distribución, en términos no solo de compensación de carga, sino también de regulación de tensión, entre otras [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16]. Más de 40 publicaciones técnicas son referenciadas con el fin de presentar las principales tendencias del dispositivo con respecto a: sus modos de operación, opciones de compensación, estructura y configuración del convertidor de potencia, y sus estrategias de control; siendo este último tema el más relevante del artículo, debido al amplio trabajo desarrollado en este campo y al importante rol que juegan estas estrategias en el rendimiento del compensador [15], [17].

El estado del arte del DSTATCOM es presentado en cinco secciones. En la sección 2 se introduce el principio de operación del DSTATCOM, se exponen los dos modos de operación de este dispositivo y las diferentes opciones de compensación que éste ofrece. En la sección 3 se muestran las diferentes topologías del DSTATCOM, según el tipo de convertidor de potencia y el sistema de alimentación y/o la carga a la cual se encuentra conectado. Además, se presenta una revisión de los principales componentes del compensador. En la sección 4 se presentan las principales tendencias de las estrategias de control utilizadas en el DSTATCOM. Finalmente en la sección 5 se resaltan las principales conclusiones del trabajo.

2. PRINCIPIO DE OPERACIÓN DEL DSTATCOM

Un compensador estático de potencia es un dispositivo basado en la electrónica de potencia, que al ser conectado en paralelo ya sea con el sistema de distribución o con la carga, permite compensar perturbaciones que tienen origen tanto en la demanda como en la red eléctrica [1]. En la Figura 1, se muestra el esquema general del DSTATCOM, el cual consta de

un elemento almacenador de energía DC, un inversor de potencia y un sistema de control [1], [18]. El punto al cual el compensador es conectado a la red es llamado punto de acoplamiento común (PCC, *Point of Common Coupling*).

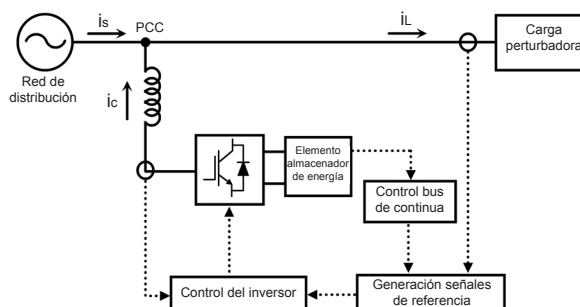


Figura 1. Esquema general del DSTATCOM.

El principio básico del DSTATCOM consiste en inyectar una corriente al sistema, la cual permita compensar las perturbaciones de interés y que además, demande del compensador una potencia instantánea de valor medio igual a cero en estado estable. Para esto, el DSTATCOM debe tener la capacidad de [1], [18]:

- Medir las corrientes y tensiones del sistema necesarias para calcular las señales a inyectar.
- Calcular las señales de referencia que debe generar el dispositivo para realizar la compensación
- Mantener la tensión o la corriente del bus de continua en un valor que permita la controlabilidad del compensador
- Determinar las señales de disparo del inversor tal que las señales generadas por éste, sigan las señales de referencia deseadas.

En general, el DSTATCOM puede operar en dos modos básicos: modo control de corriente y modo control de tensión [1], [8]. Dependiendo de su modo de operación, el DSTATCOM podrá compensar diferentes tipos de perturbaciones, ya sea relacionadas con la corriente que demanda la carga o con las tensiones del sistema de distribución.

2.1 Modo control de corriente

Cuando el DSTATCOM opera en modo control de corriente, éste es conectado en paralelo con la carga. El comportamiento ideal del dispositivo, puede ser representado por una fuente de corriente controlada [1]. En este modo de operación, el dispositivo realiza funciones de compensación de carga, entre las cuales

se encuentran [7], [12], [13], [15], [17], [19], [20], [21]: corrección del factor de potencia, mitigación de la distorsión armónica de la corriente que demanda la carga, compensación de la componente de continua y de desequilibrios presentes en las corrientes que fluyen por la red de suministro.

Una compensación perfecta conlleva a que el DSTATCOM inyecte una corriente de compensación tal que la corriente resultante por la red de alimentación, sea fundamental y estrictamente de secuencia positiva. Además, el compensador debe forzar la corriente por la red a estar en fase con la tensión en el PCC.

En este modo de operación, el DSTATCOM permite prevenir que cargas perturbadoras (cargas no lineales y desequilibradas) contaminen el resto del sistema de distribución y produzcan desequilibrio y distorsión armónica en la tensión del sistema de distribución, afectando de esta manera a los demás usuarios de la misma red [1], [22]. Además, permite reducir la alta demanda de potencia reactiva producida por cargas de bajo factor de potencia, lo cual reduce no solo caídas significativas de tensión en la red, sino también grandes pérdidas en el sistema de alimentación[1].

2.2 Modo control de tensión

Cuando el DSTATCOM opera en modo control de tensión, éste es conectado en el nodo del sistema de distribución donde se quiere regular la tensión. El comportamiento ideal del dispositivo, puede ser representado por una fuente de tensión controlada. En este modo de operación, el dispositivo controla la tensión del nodo de conexión, por lo que puede realizar las siguientes acciones: regulación de tensión [7], [8], [19], [23], compensación de variaciones de tensión de corta duración (huecos y elevaciones de tensión) [10], [11], [23], [24], [25], compensación del desbalance de tensión [1], [8], mitigación de la distorsión de la forma de onda de la tensión [1], [8] y compensación de fluctuaciones de tensión (voltage flicker) [10], [14], [26].

Con el fin de compensar este tipo de perturbaciones, el DSTATCOM debe inyectar una corriente de tal manera que la tensión del nodo de conexión siga una referencia especificada. Este modo es utilizado principalmente para prevenir a las cargas sensibles de perturbaciones presentes en la tensión de alimentación [1], [9], [10], [11].

3. ESTRUCTURA DEL CIRCUITO DE POTENCIA

La estructura del DSTATCOM puede ser clasificada según la topología del convertidor de potencia y el número de fases y de hilos del sistema [7],[27],[28].

3.1 Clasificación basada en el convertidor

Esta clasificación se realiza de acuerdo al tipo de elemento almacenador de energía del convertidor de potencia. Si la energía se almacena en un condensador, la topología del convertidor se basa en un inversor tipo fuente de tensión (VSC, *Voltage Source Converter*), mostrado en la Figura 2; mientras que si la energía se almacena en una bobina, la topología del convertidor se basa en un inversor tipo fuente de corriente (CSC, *Current Source Converter*), el cual se muestra en la Figura 3 [18], [27].

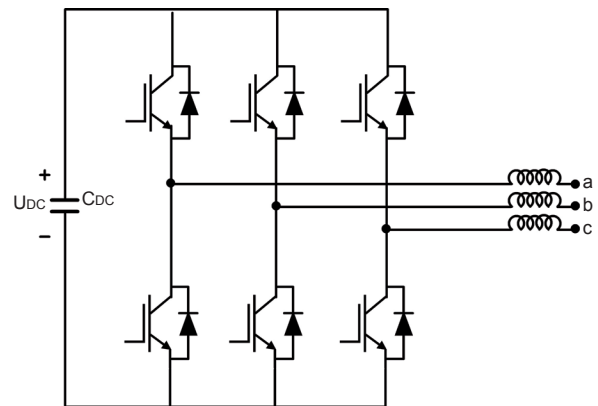


Figura 2. Convertidor tipo fuente de tensión.

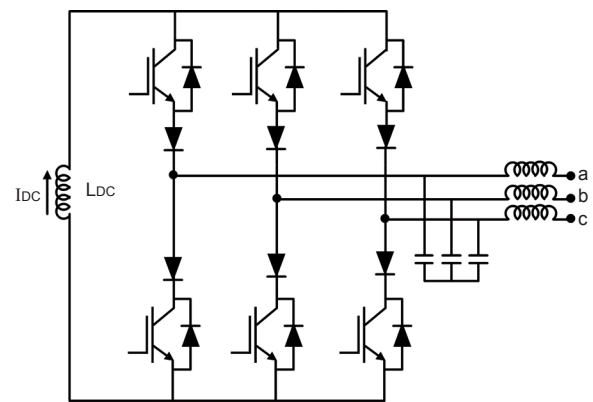


Figura 3. Convertidor tipo fuente de corriente.

La estructura basada en el VSC se conecta a la red por medio de un filtro de primer o tercer orden. Generalmente el filtro es de primer orden y consiste de un elemento inductivo, el cual garantiza la controlabilidad del compensador y además permite atenuar el rizado de alta frecuencia de la corriente que inyecta el compensador, generado por la conmutación del inversor [18], [27], [28]. Este elemento inductivo puede ser también la reactancia de un transformador, en caso de que el compensador se conecte a otro nivel de tensión.

La estructura basada en el CSC se conecta a la red por medio de un filtro de segundo orden pasa bajas, el cual también permite atenuar el rizado de alta frecuencia de la corriente que inyecta el compensador, sin embargo, puede llegar a amplificar los armónicos cercanos a su frecuencia de resonancia [27], [28].

3.1.1 Consideraciones en la selección de los componentes

Para el diseño del compensador se deben tener en cuenta los siguientes ítems:

- El capacitor y la bobina de las estructuras VSC y CSC, respectivamente, deben seleccionarse tal que se evite el rizado y las fluctuaciones en el bus de continua [7], [27]. Además, la tensión o la corriente del bus de DC, debe seleccionarse de tal forma que el compensador sea capaz de seguir las señales de referencia y no se pierda la controlabilidad del dispositivo.
- Los dispositivos semiconductores utilizados en el inversor son IGBT's (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) y GTO's (*Gate Turn Off Thyristors*). Actualmente, los DSTATCOM's usan generalmente IGBT's ya que presentan menores pérdidas y pueden operar a mayores frecuencias que los GTO's. Sin embargo, los GTO's son utilizados para aplicaciones de alta potencia. Otros dispositivos que pueden ser utilizados son los MOSFET's (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors*). Éstos pueden operar más rápido que los IGBT's, pero su uso está limitado a aplicaciones de muy baja potencia [7], [27].

Los dispositivos semiconductores para la estructura VSC, deben permitir un flujo bidireccional de corriente y soportar una tensión unipolar limitada por el bus de continua, por lo que se utilizan generalmente IGBT's con diodos antiparalelo. Para la estructura CSC, los

dispositivos deben soportar una tensión bipolar cuyo pico corresponde a la tensión de línea del sistema y una corriente unidireccional limitada por el bus de continua. En este caso, pueden usarse GTO's con capacidad de bloqueo inverso de tensión o IGBT's con un diodo conectado en serie [27].

3.1.2 Comparación entre las estructuras VSC y CSC

La principal ventaja de la estructura VSC con respecto a la CSC, está en el elemento almacenador de energía, ya que un condensador es más eficiente, más sencillo de controlar, más pequeño y barato que una bobina que almacena igual cantidad de energía [18], [27]. Esta ventaja ha hecho que la estructura VSC sea más investigada y utilizada que la estructura CSC [27], [28]. Sin embargo, es posible que en un futuro se incremente el uso de la estructura CSC con la utilización de bobinas superconductoras [18], [27].

Aunque la eficiencia de la estructura VSC en el punto de operación nominal es mejor que la de la estructura CSC, en cargas de baja potencia la estructura CSC presenta una mejor eficiencia [28]. Otra desventaja de la estructura CSC está en el hecho de que no puede ser expandida a convertidores multinivel y multipaso, lo cual si es posible con la estructura VSC [3], [7]. Además, los dispositivos semiconductores de la estructura CSC deben tener capacidad de bloqueo inverso de tensión, por lo que deben utilizarse GTO's o IGBT's con diodos conectados en serie, lo cual es una desventaja con respecto a la estructura VSC [27].

3.2 Clasificación basada en el número de hilos del sistema

La estructura del compensador depende del sistema de alimentación y/o de la carga al cual el compensador es conectado, por lo que se puede clasificar en: compensador monofásico (dos hilos) y compensador trifásico de tres y cuatro hilos [1], [7], [18].

3.2.1 Compensador monofásico

Existe una gran cantidad de cargas monofásicas utilizadas en los hogares, en el comercio y en las industrias. Es posible conectar un compensador en paralelo a estas cargas individuales o acumuladas en un punto de la red de suministro [1], [7]. Existen dos configuraciones para el convertidor monofásico. Una de ellas es un inversor de puente completo de dos ramas. La otra corresponde a un inversor de una rama con condensador repartido [18].

3.2.2 Compensador trifásico de tres hilos

La estructura del compensador más utilizada para sistemas trifásicos de tres hilos se muestra en la Figura 2. Ésta consiste de un inversor de tres ramas. La desventaja de esta topología es el hecho de que la suma de las corrientes por las tres ramas debe ser igual a cero, por lo que no es posible compensar desequilibrios de origen homopolar [1], [8], [18].

3.2.3 Compensador trifásico de cuatro hilos

Las topologías de cuatro hilos permiten mitigar más perturbaciones, debido a que es posible compensar las componentes de secuencia cero y eliminar la componente de continua de las corrientes que demanda la carga [1], [18]. En general, se pueden considerar tres configuraciones del convertidor:

- Inversor de tres ramas con capacitor repartido: esta topología contiene dos condensadores cuyo punto medio de conexión es conectado al neutro de la carga, lo cual permite un camino para la componente de secuencia homopolar de la corriente [1], [12]. Ésta es la topología más económica de las tetrafilares y es utilizada para aplicaciones de baja potencia [7]. Además, es fácil de controlar ya que es posible desacoplar las tres ramas y manejarlas como si fuesen monofásicas [18].
- Inversor de puente completo con cuatro ramas: esta topología requiere de un solo condensador. Tres de las ramas son conectadas a las fases de sistema, mientras que la otra se conecta al neutro de la carga [1].
- Inversor con tres puentes completos monofásicos y cuatro hilos: En esta estructura cada uno de los puentes monofásicos es conectado a la red a través de un transformador, el cual permite aislar los inversores y previene posibles cortos en el condensador de almacenamiento de energía del bus de DC [1], [8], [12]. Esta topología permite una mayor capacidad de generación de corrientes de todas las secuencias (positiva, negativa y homopolar) [18] y mejora la confiabilidad del compensador [7].

Para mejorar el rango de tensión al cual se puede conectar el compensador y la capacidad de potencia de éste, se utilizan topologías multinivel y multipaso [1], [24], [29].

4. ESTRATEGIAS DE CONTROL

Las estrategias de control del DSTATCOM juegan un papel muy importante en el rendimiento general del dispositivo y en las características de compensación deseadas. Estas estrategias deben garantizar que el dispositivo inyecte la corriente necesaria para compensar las perturbaciones de interés [22]. Para llevar a cabo este propósito, el DSTATCOM utiliza tres lazos de control, según se observa en la Figura 1. El primer lazo de control esta encargado de calcular las señales de compensación o señales de referencia, en términos de tensiones y/o corrientes, según el modo de operación del compensador y las opciones de compensación que éste ofrece. El segundo lazo esta encargado de controlar la tensión del bus de continua del compensador con el fin de que ésta permanezca en un valor que garantice la controlabilidad del dispositivo. Finalmente, el tercer lazo de control tiene como función generar las señales de conmutación de los dispositivos semiconductores del convertidor, tal que la señal generada por el compensador siga la señal de referencia [3], [7], [18], [30].

Estos algoritmos de control son implementados en dispositivos microelectrónicos como los microcontrolados o los procesadores digitales de señales (DSP, *Digital Signal Processing*), los cuales permiten realizar el procesamiento de los datos lo suficientemente rápido, tal que el compensador funcione adecuadamente [18], [30].

La eficiencia y las características de compensación del DSTATCOM, así como su rapidez, respuesta transitoria y rendimiento en estado estable dependen de estas estrategias de control. En consecuencia, los aspectos relacionados con el control de estos compensadores, han sido un área de gran interés entre los investigadores del tema [22], [30].

4.1 Estrategias para la obtención de las señales de referencia

Las señales de referencia son aquellas que debe generar el DSTATCOM para compensar las perturbaciones de interés. Estas señales dependen del tipo de perturbación y del modo de operación del dispositivo. Para el caso del modo control de corriente, la señal de referencia debe contener todas las componentes que hacen que la corriente de la carga se desvíe de la ideal, la cual depende del problema que se desea mitigar. En el caso del modo control de tensión, la señal de referencia es la tensión ideal que se desea obtener en el nodo de conexión del

compensador a la red [1]. Independientemente de la técnica de control utilizada, el algoritmo debe extraer la señal de referencia con el menor error posible y operar adecuadamente bajo régimen transitorio y en estado estable [18], [30].

Las estrategias de control para generar las señales de referencia están basadas en técnicas de compensación en el dominio de la frecuencia o en el dominio del tiempo. A continuación se presentan las principales tendencias.

4.1.1 Compensación basada en el dominio de la frecuencia

Las estrategias de control en el dominio de la frecuencia están basadas en el análisis de Fourier de las señales distorsionadas de tensión o de corriente. Por medio de este análisis es posible extraer la componente fundamental de una señal distorsionada y generar la señal de referencia que permita eliminar los armónicos presentes en la corriente demandada por la carga o en la tensión del nodo de conexión [7], [8]. Una de las desventajas de esta estrategia radica en la necesidad de estimar la frecuencia de la señal cuando ésta no es conocida, para lo cual se suele usar un lazo de seguimiento de fase (PLL, *Phase Locked Loop*). Además, es necesario realizar una posterior sincronización para reconstruir la señal de referencia en el dominio del tiempo. Los cálculos necesarios para la generación de las señales de referencia, producen grandes tiempos de respuesta y relegan esta tendencia por detrás de los métodos de compensación que trabajan directamente en el dominio del tiempo [3], [7], [18], [30].

Otra aplicación de las estrategias de control basadas en el análisis de Fourier, es la extracción de la señal que modula a la fluctuación de tensión (*voltage flicker*). En este caso, las estrategias de control presentan las mismas desventajas que para el caso de compensación de armónicos [10].

4.1.2 Compensación basada en el dominio del tiempo

Las estrategias de control que trabajan directamente en el dominio del tiempo realizan el cálculo instantáneo de las señales de referencia. Existen una gran cantidad de estas estrategias, entre las cuales se pueden destacar aquellas basadas en las teorías de la potencia instantánea, en la teoría del marco de referencia síncrono $d-q-0$ (SRF, *Synchronous Reference Frame*), en la teoría de las componentes simétricas instantáneas y aquellas basadas en filtros sintonizados y adaptativos [3], [7], [18], [30], [31], [32], [33], [34].

Compensación basada en las teorías de la potencia instantánea

Estas teorías se basan en la descomposición de la potencia instantánea con el fin de estudiar el significado físico de sus componentes y considerar el efecto que tienen los diferentes tipos de perturbaciones de las señales eléctricas sobre éstas [18], [32]. En la actualidad, existen una gran cantidad de estas teorías, sin embargo, no se ha podido llegar a “un consenso sobre una teoría única donde las componentes de potencia presentes en los casos atípicos tengan asociado un claro significado físico” [18].

En general, las teorías de potencia proporcionan información acerca de como se puede mejorar el intercambio de energía entre la red de suministro y la carga, por medio de compensación [32]. Su principio de operación se basa en la descomposición de la potencia instantánea demandada por la carga, en una componente de potencia útil y una potencia no útil de promedio nulo asociada a la potencia no activa. El cálculo de las señales de referencia se realiza de tal forma que la potencia instantánea entregada por el compensador sea de valor medio igual a cero, con el fin de eliminar las perturbaciones cuyo efecto en la potencia útil es nulo [18].

A partir de este concepto general, se han propuesto diferentes teorías las cuales se diferencian según la manera en la que se descompone la potencia instantánea, las fases del sistema eléctrico que se analizan y el marco de referencia que se utiliza. Entre las teorías más referenciadas, se encuentran: Teoría de Fryze, Buchholz y Depenbrock [18], [32], [33] y la teoría de la potencia reactiva instantánea pq [15], [35], [36].

Las estrategias de compensación fundamentadas en las teorías de Fryze, Buchholz y Depenbrock se basan en la estimación de una corriente de suministro que tenga la misma forma de onda y fase de la tensión de alimentación y además, transporte la potencia activa que demanda la carga, por lo que el compensador entrega la componente de la potencia no activa. Estas estrategias tienen la ventaja de trabajar en el marco de referencia estático $a-b-c$, permitiendo de esta manera su posible utilización en aplicaciones monofásicas. Además, permiten compensar la distorsión armónica y el desequilibrio de las corrientes que demanda la carga y mejorar el factor de potencia, bajo condiciones ideales de tensión de alimentación. Sin embargo, su principal desventaja radica en el hecho de que la corriente de suministro depende de la forma de onda de la tensión,

por lo tanto, bajo tensiones de alimentación no ideales, la compensación no mejora la calidad de la forma de onda de la corriente, a pesar de que el objetivo de la estrategia de control se consigue [18], [32], [33].

Una de las teorías más referenciadas y utilizadas para el cálculo de las señales de referencia, es la teoría de la potencia reactiva instantánea pq , la cual ha sido el punto de partida del desarrollo de muchas estrategias de control [15], [30], [31],[34], [35], [36], [37]. Fue propuesta en 1983 por Akagi, Kanazawa y Nabae [38], y desde allí, ha estado sujeta a diferentes interpretaciones y modificaciones [35]. Ésta teoría utiliza la transformación de coordenadas propuesta por Clarke, para pasar del dominio $a-b-c$ al marco de referencia $\alpha-\beta-0$ y viceversa.

La teoría original fue inicialmente aplicada para sistemas trifásicos de tres hilos con secuencia homopolar nula, por lo que sus fundamentos se desarrollan en el marco de referencia ortogonal $\alpha-\beta$, siendo ésta una de sus mayores ventajas, ya que reduce el número de variables utilizadas en los cálculos. En general, la teoría pq descompone la potencia instantánea en dos componentes p y q (potencia instantánea real e imaginaria, respectivamente). En principio, las estrategias de control basadas en esta teoría tienen como objetivo compensar la componente de potencia instantánea imaginaria q . Sin embargo, se encuentran diversas estrategias, las cuales modifican las componentes de la potencia a compensar, para obtener diferentes objetivos [15], [30], [31] [35], [36], [37].

Para extender la teoría pq a sistemas trifásicos tetrafilares, Akagi considera las componentes de secuencia homopolar en [38], [39]. Además, en los últimos años se han desarrollado otras teorías basadas en la teoría pq , entre las cuales se destacan la teoría pq modificada y la teoría $p-q-r$ [18], [31], [35], [40].

En general, la compensación basada en la teoría pq , presenta resultados satisfactorios bajo condiciones ideales de tensión de alimentación, ya que permite compensar distorsión armónica, desequilibrio de las corrientes que demanda la carga y mejorar el factor de potencia. Sin embargo, bajo condiciones no ideales de tensión, aunque el objetivo de la estrategia se consigue, este método puede generar distorsiones y desequilibrios en las corriente de suministro de la red eléctrica [18], [30], [34],[35], [36], [37].

Para mejorar las desventajas de las estrategias de control basadas en la teorías de la potencia instantánea, se han propuesto esquemas más generales fundamentados en

estas mismas teorías, los cuales buscan obtener opciones de compensación satisfactorias, bajo condiciones no ideales de la señal de tensión de alimentación, con el fin de mejorar el rendimiento y la versatilidad del dispositivo [18], [35], [36], [41], [42].

Compensación basada en la teoría del marco de referencia sincrónico $d-q-0$ (SRF, Synchronous Reference Frame)

Esta teoría esta basada en la transformación de Park, mediante la cual, las corrientes son transformadas del marco de referencia estático $a-b-c$, al marco de referencia sincrónico $d-q-0$. El marco de referencia es sincronizado a la frecuencia fundamental de la tensión de suministro, de tal forma que la componente de la corriente de secuencia positiva a la frecuencia fundamental, se ve en el dominio $d-q-0$ como una cantidad de continua; mientras que las otras componentes se convierten en cantidades variables en el tiempo. En principio, la compensación basada en esta teoría, asume que la corriente de suministro debe ser igual a la corriente fundamental de secuencia positiva de la carga, la cual, al ser una componente de continua en el marco $d-q-0$, es fácil de filtrar, siendo ésta una de sus mayores ventajas [15], [30], [31], [35], [36]. Sin embargo, una de sus desventajas es la necesidad de utilizar una herramienta para estimar el ángulo de sincronismo, para lo cual, se usa generalmente un PLL, cuyo adecuado ajuste es crucial para el desempeño del compensador [15], [18], [31].

Las estrategias basadas en esta teoría, permiten compensar distorsión armónica y desequilibrios de las corrientes demandadas por la carga, bajo condiciones ideales de la tensión de suministro. Además, es posible mejorar el factor de potencia de la carga teniendo en cuenta algunas consideraciones [36]. Sin embargo, cuando la tensión de suministro no es ideal, estas estrategias conllevan a distorsiones y desequilibrios en las corriente de suministro [15], [31] [35], [36].

Compensación basada en la teoría de las componentes simétricas instantáneas

Esta teoría utiliza la matriz de transformación de componentes simétricas, para descomponer las corrientes y tensiones instantáneas trifásicas, en sus componentes de secuencia positiva (directa), negativa (inversa) y cero (homopolar), para cada una de las fases del sistema [1]. A partir de esta descomposición, es posible obtener diferentes estrategias que permiten conseguir: compensación de armónicos y desequilibrios

de las corrientes; y corrección del factor de potencia [1], [8], [12], [16], [21], [22].

Compensación basada en filtros sintonizados y adaptativos

Los filtros sintonizados permiten filtrar señales distorsionadas con el fin de obtener su componente fundamental, permitiendo de esta manera compensar los armónicos de la señal. Sin embargo, estas estrategias requieren de una herramienta de sincronización para lo cual se suele usar un PLL, cuyo adecuado ajuste es crucial para el desempeño del filtro. Además, entre más selectivo sea el filtro, se obtienen mayores tiempos de respuesta para alcanzar el estado estable, resultando en respuestas lentas [18], [30].

Los filtros adaptativos permiten estimar de manera recursiva los parámetros de interés de una señal [18], [43]. Estos filtros pueden ser usados para extraer la componente fundamental de una señal distorsionada con el objetivo de compensación de armónicos [15], [18], [44]. Además se pueden emplear para extraer la envolvente de huecos o elevaciones de tensión, la señal que modula las fluctuaciones de tensión [10] y las componentes simétricas instantáneas de señales de tensión y/o corriente [18],[43].

Compensación basada en el control del bus de continua

Las señales de referencia se obtienen a partir del control del bus de continua, de tal forma que la tensión (en el VSC) o la corriente (en el CSC) del bus, se mantenga en un valor de referencia determinado. Para la generación de las señales se utiliza un controlador proporcional integral (PI) o un controlador en modo deslizante (*Sliding Mode Controller*) [3], [13], [17]. Estas estrategias de control pueden resultar en respuestas dinámicas lentas.

Otras estrategias para el cálculo de las señales de referencia

Aparte de todas las estrategias de control expuestas anteriormente, existen otras propuestas las cuales se basan en algoritmos de control tradicionales (p.e. control PI), o utilizan los principios de las teorías, filtros y estrategias de control expuestas anteriormente, para generar estrategias que ofrecen resultados satisfactorios para diferentes tipos de perturbaciones, bajo determinados condiciones del sistema [11], [13], [19], [26]. Además, también se encuentran propuestas

basadas en redes neuronales, las cuales requieren de un entrenamiento fuera de línea para un grupo de cargas y unas condiciones de operación determinadas, lo cual puede hacer que sean ineficientes para cambios dinámicos en el sistema [45].

4.2 Estrategias de control del bus de continua

A pesar de que el DSTATCOM se diseña de tal forma que la potencia instantánea entregada por éste, es de valor medio igual a cero, existen pérdidas relacionadas con la conmutación de los dispositivos semiconductores y con el filtro o el transformador de conexión del compensador a la red, entre otras. Estas pérdidas pueden llevar a la descarga del elemento almacenador del bus de continua, resultando en una pérdida de la controlabilidad del compensador. Por lo tanto, resulta de vital importancia mantener el nivel de tensión o de corriente del bus de continua en un valor de referencia predeterminado. Para esto, es utilizado generalmente un controlador proporcional integral (PI). En este caso, la señal de error resultante de comparar la señal de referencia y la señal del bus de continua, se utiliza para obtener una componente de referencia, la cual generalmente es incluida en los comandos de referencia que debe generar el compensador [8], [15], [18], [19].

4.3 Estrategias de control del convertidor de potencia

La finalidad de estas estrategias de control es el cálculo de las señales de conmutación de los dispositivos semiconductores del convertidor de potencia, con el fin de que las señales generadas por éste, sigan con el menor error posible, las señales de referencia deseadas. Debido al tipo de perturbaciones que el DSTATCOM puede compensar, la corriente que éste inyecta esta generalmente caracterizada por un alto contenido de armónicos, por lo que el convertidor de potencia y su estrategia de control deben tener la capacidad de seguir variaciones repentinas de la señal de referencia [30], [46].

Las estrategias empleadas para controlar el convertidor de potencia se pueden clasificar en general en dos tipos: técnicas de control de lazo abierto y técnicas de control de lazo cerrado. Entre las técnicas de control de lazo abierto se encuentran la modulación por ancho de pulso (PWM, *Pulse Width Modulation*) y la modulación vectorial (SVM, *Space Vector Modulation*) [1], [18], [47]. Sin embargo, los dispositivos *Custom Power* utilizan generalmente técnicas de control de lazo cerrado con el fin de obtener un correcto seguimiento

de la señal de referencia, a pesar de la existencia de condiciones variables en el sistema y de cargas variables en el tiempo [1], [18].

El principio de operación de las estrategias de control de lazo cerrado se basa en la obtención de una señal de actuación, generada a partir de la señal de error correspondiente a la diferencia entre la señal de referencia y la señal real resultante de la compensación [18]. En general, los controladores de lazo cerrado se pueden clasificar según su modo de funcionamiento, en dos grupos: controladores lineales y no lineales [47]. A continuación, se presentan las principales tendencias.

4.3.1 Controladores no lineales

En general estos controladores obtienen directamente las señales de conmutación del inversor de potencia, a partir de la señal de error. Entre los controladores no lineales más referenciados se encuentran: el control de histéresis y la modulación delta (DM, *Delta Modulation*) [3], [14], [17], [30], [46], [47], [48].

Control de histéresis

Se basa en la obtención de las señales de conmutación del inversor, a partir de la comparación de la señal de error con una banda de histéresis fija, con el fin de mantener el error entre los límites inferior y superior de esta banda [18], [30], [46]. Ésta es una de las técnicas más utilizadas debido a su sencillez, facilidad de implementación y robustez. Además, una banda de histéresis pequeña permite obtener pequeños errores de seguimiento, sin embargo, puede conllevar a muy altas frecuencias de conmutación que ningún convertidor puede seguir. Otra de sus desventajas, es el hecho de que la frecuencia de modulación es variable, lo que hace difícil el diseño del filtro de conexión del compensador a la red. Además, el rendimiento del controlador se ve afectado por la interacción de las corrientes de fase, en sistemas trifásicos con neutro aislado [14], [30], [46], [47]. Sin embargo, existen propuestas que han permitido superar estas limitaciones, entre las cuales se encuentran técnicas para desacoplar las corrientes de fase y estrategias que buscan frecuencias de conmutación fijas variando el ancho de la banda de histéresis [46], [47].

Modulación Delta (DM, *Delta Modulation*)

Esta técnica es una variación del control por histéresis tradicional. Se basa en la utilización de una frecuencia de muestreo fija, de tal forma que la señal de error es

detectada en los instantes de muestreo y comparada con una banda de histéresis generalmente de valor nulo. El control es realizado cada periodo de muestreo, de tal manera que las señales de control son constantes durante cada periodo [18], [44], [47]. Esta técnica es sencilla y robusta, sin embargo, presenta mayores errores de seguimiento comparado con el control de histéresis [14].

4.3.2 Controladores lineales

En contraste con los controladores no lineales, los esquemas de control lineal tienen separada la parte encargada de la compensación de la señal de error (cálculo de la tensión de salida del convertidor), de la modulación de la tensión (determinación de las señales de conmutación del inversor). La tensión de salida que debe generar el convertidor se calcula a partir de la señal de error. Una vez calculadas las tensiones de control, éstas son sintetizadas generalmente por medio de una técnica de control de lazo abierto basada en la modulación por ancho de pulso o en la modulación vectorial [1], [18], [47]. Dentro de los controladores lineales más referenciados se encuentran: el regulador Proporcional Integral (PI) en ejes estáticos o en ejes síncronos y el control predictivo de tiempo de establecimiento finito (*deadbeat*).

Controlador Proporcional Integral (PI) en ejes estáticos

Su finalidad es calcular los comandos de tensión del convertidor de potencia por medio de una acción de control proporcional a la señal de error y otra acción proporcional a la integral del error. Este control es sencillo y puede ser implementado analógicamente. Sin embargo, una de sus desventajas es su limitado ancho de banda, el cual está restringido a una frecuencia por debajo de la frecuencia de modulación, lo cual implica errores en el seguimiento de armónicos de alto orden. Además, presenta un inherente error de fase y amplitud [14], [46], [47], [48].

Controlador Proporcional Integral (PI) en ejes síncronos

En este caso el control proporcional integral, es implementado en el marco de referencia síncrono $d-q$. Gracias a esta transformación, las componentes fundamentales de las señales de tensión y de corriente, se convierten en componentes de continua, por lo que el controlador PI reduce el error de la componente fundamental a cero. Lo anterior, hace que este

controlador sea más efectivo que el controlador PI en ejes estáticos [11], [46], [47]. Sin embargo, este control también presenta la desventaja de un ancho de banda limitado.

Control de tiempo de establecimiento finito (*deadbeat*)

El control predictivo basado en *deadbeat*, busca calcular los comandos de tensión del convertidor de tal forma que la señal de referencia sea alcanzada al final del periodo de muestreo. En general, el principal objetivo de este controlador es conseguir un error nulo en régimen permanente, en un mínimo número de periodos de muestreo [18], [44], [46], [47], [48]. Para alcanzar este propósito, el controlador necesita conocer información adicional sobre el sistema a controlar. Esta estrategia presenta un mejor comportamiento que las técnicas basadas en PI, histéresis y modulación delta; ya que permite obtener respuestas más precisas [14], [18].

4.3.3 Otros controladores

En la literatura se encuentran otras estrategias de control generalmente utilizadas para sistemas de segundo o más alto orden. Entre estas estrategias están: el control en modo deslizante (*Sliding Mode Controller*), el regulador cuadrático lineal (LQR, *Linear Quadratic Regulator*) [8], [21] y el control por desplazamiento de polos (*Pole Shift Controller*) [1], [7]. Además se encuentran propuestas basadas en redes neuronales [47], [14], [49], [50].

5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una revisión del estado del arte del Compensador Estático de Potencia utilizado para la compensación de perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución. Este dispositivo ofrece opciones de compensación de carga cuando opera en modo control de corriente y opciones de mitigación de perturbaciones relacionadas con la tensión del sistema, en el modo control de tensión.

Las estrategias de control del DSTATCOM se han presentado como el ítem más relevante del artículo, ya que de éstas depende tanto las características de compensación del dispositivo, como su eficiencia, rapidez, respuesta transitoria y rendimiento en estado estable. Estas estrategias presentan diferentes resultados y opciones de compensación según los tipos de perturbaciones y las condiciones de operación del

sistema, por lo que su correcta selección y utilización para una aplicación específica, caracterizan la respuesta del dispositivo.

Con el continuo desarrollo de los dispositivos semiconductores y el alto rendimiento de los DSP's, los Compensadores Estáticos de Potencia podrán desarrollarse con mayores funciones de compensación, mayor rendimiento y más bajos costos. Además, el interés de las empresas de distribución y de los clientes del sistema por un alto nivel de calidad de la energía, llevará a que este tipo de dispositivos sean más utilizados e implementados.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Industrial de Santander por su apoyo a este trabajo mediante el proyecto VIE-DIEF-5538: Estudio e implementación en tiempo real de algoritmos de estimación de magnitudes eléctricas para el control de dispositivos *Custom Power*.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Ghosh and G. Ledwich, Power quality enhancement using custom power devices, 1st ed.: Kluwer's power electronics and power systems series, 2002.
- [2] J.C. Das, "Passive filters - potentialities and limitations," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 40, 2004, pp. 232-241.
- [3] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 46, 1999, pp. 960-971.
- [4] M. El-Habrouk, M.K. Darwish, and P. Mehta, "Active power filters: a review," Electric Power Applications, IEE Proceedings -, vol. 147, 2000, pp. 403-413.
- [5] B. Singh, V. Verma, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Hybrid filters for power quality improvement," Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, vol. 152, 2005, pp. 365-378.
- [6] N.G. Hingorani, "Introducing custom power," Spectrum, IEEE, vol. 32, 1995, pp. 41-48.

- [7] Y. Pal, A. Swarup, and B. Singh, "A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement," Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on, pp. 1-8.
- [8] G. Ledwich and A. Ghosh, "A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode," Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, vol. 149, 2002, pp. 215-224.
- [9] H. Masdi, N. Mariun, S. Mahmud, A. Mohamed, and S. Yusuf, "Design of a prototype D-STATCOM for voltage sag mitigation," Power and Energy Conference, 2004. PECon 2004. Proceedings. National, pp. 61-66.
- [10] A. Elnady and M.M.A. Salama, "Unified approach for mitigating voltage sag and voltage flicker using the DSTATCOM," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 20, 2005, pp. 992-1000.
- [11] Rong Cai, M. Bongiorno, and A. Sannino, "Control of D-STATCOM for voltage dip mitigation," Future Power Systems, 2005 International Conference on, pp. 6.
- [12] A. Hasanzadeh, M. Parniani, and S.M.R. Sadriyeh, "A comparative study on current control methods for load balancing and power factor correction using STATCOM," Power Tech, 2005 IEEE Russia, 2005, pp. 1-7.
- [13] D. Masand, S. Jain, and G. Agnihotri, "Control Algorithms for Distribution Static Compensator," Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on, vol. 3, pp. 1830-1834.
- [14] Tan Tian yuan, Jiang Qi rong, Li Gang, and Lai Yu xiang, "Comparison of Direct and Indirect Current Control Strategy for DSTATCOM," Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on, pp. 1-8.
- [15] B. Singh and Jitendra Solanki, "A Comparative Study of Control Algorithms for DSTATCOM for Load Compensation," Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on, pp. 1492-1497.
- [16] M.K. Mishra, K. Karthikeyan, and P.K. Linash, "A development and implementation of DSP based DSTATCOM to compensate unbalanced nonlinear loads," Power India Conference, 2006 IEEE, pp. 8.
- [17] B. Singh, A. Adya, A.P. Mittal, and J.R.P. Gupta, "Modeling, Design and Analysis of Different Controllers for DSTATCOM," Power System Technology and IEEE Power India Conference, 2008. POWERCON 2008. Joint International Conference on, pp. 1-8.
- [18] J.F. Petit, "Control de filtros activos de potencia para la mitigación de armónicos y mejora del factor de potencia en sistemas desequilibrados," Ph.D. dissertation, Universidad Carlos III de Madrid, 2007.
- [19] B. Singh, A. Adya, A.P. Mittal, and J.R.P. Gupta, "Analysis, simulation and control of DSTATCOM in three-phase, four-wire isolated distribution systems," Power India Conference, 2006 IEEE, pp. 6.
- [20] G. Escobar, A.M. Stankovic, and P. Mattavelli, "Reactive power, imbalance and harmonics compensation using d-statcom with a dissipativity-based controller," Decision and Control, 2000. Proceedings of the 39th IEEE Conference on, vol. 4, pp. 3051-3055.
- [21] A. Ghosh and G. Ledwich, "Load compensating DSTATCOM in weak AC systems," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 18, 2003, pp. 1302-1309.
- [22] U.K. Rao, M.K. Mishra, and A. Ghosh, "Control Strategies for Load Compensation Using Instantaneous Symmetrical Component Theory Under Different Supply Voltages," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 23, 2008, pp. 2310-2317.
- [23] Soo-Young Jung, Tae-Hyun Kim, Seung-Il Moon, and Byung-Moon Han, "Analysis and control of DSTATCOM for a line voltage regulation," Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, vol. 2, pp. 729-734.

- [24] C. Sharmeeela, G. Uma, and M.R. Mohan, "Multi-level distribution STATCOM for voltage sag and swell reduction," Power Engineering Society General Meeting, 2005. IEEE, vol. 2, pp. 1303-1307.
- [25] M.H. Haque, "Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM," Power Tech Proceedings, 2001 IEEE Porto, vol. 1, pp. 5.
- [26] J. Sun, D. Czarkowski, and Z. Zabar, "Voltage flicker mitigation using PWM-based distribution STATCOM," Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE, vol. 1, pp. 616-621.
- [27] L. Benchaita, S. Saadate, and A. Salem nia, "A comparison of voltage source and current source shunt active filter by simulation and experimentation," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 14, 1999, pp. 642-647.
- [28] M. Routimo, M. Salo, and H. Tuusa, "Comparison of Voltage-Source and Current-Source Shunt Active Power Filters," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 22, 2007, pp. 636-643.
- [29] J.A. Barrena, S. Aurtenechea, J.M. Canales, M.A. Rodriguez, and L. Marroyo, "Design, analysis and comparison of multilevel topologies for DSTATCOM applications," Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on, pp. 10.
- [30] Donghua Chen and Shaojun Xie, "Review of the control strategies applied to active power filters," Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, 2004. (DRPT 2004). Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on, vol. 2, pp. 666-670.
- [31] G.D. Marques, "A comparison of active power filter control methods in unbalanced and non-sinusoidal conditions," Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, vol. 1, pp. 444-449.
- [32] V. Staudt, "Fryze - Buchholz - Depenbrock: A time-domain power theory," Nonsinusoidal Currents and Compensation, 2008. ISNCC 2008. International School on, pp. 1-12.
- [33] O. Rafael, K. Chariff, O. Mohamad, and S. Daniel, "Comparison of Reference Current Generation Techniques for Non-active Power Compensation Under Distorted and Unbalanced Conditions," IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on, pp. 2297-2302.
- [34] H. and Hirokazu, E. and Aredes, M. Akagi, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, Primera edición ed., Mohamed E. El-Hawary, Ed. New Jersey, Unites States of America: IEEE Press Editorial Board, 2007.
- [35] R.S. Herrera, P. Salmeron, and Hyosung Kim, "Instantaneous Reactive Power Theory Applied to Active Power Filter Compensation: Different Approaches, Assessment, and Experimental Results," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 55, 2008, pp. 184-196.
- [36] M. I. M., E. R. Cadaval, and F. B. Gonzalez, "Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 22, 2007, pp. 229-236.
- [37] J.C.M. Asquerino and P.S. Revuelta, "Strategies of instantaneous compensation for three-phase four-wire circuits," Power Delivery, IEEE Transactions on, vol. 17, 2002, pp. 1079-1084.
- [38] Hirofumi Akagi, Yoshihira Kanazawa, and Akira Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. IA-20, 1984, pp. 625-630.
- [39] H. Akagi, S. Ogasawara, and Hyosung Kim, "The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: a comprehensive approach," Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 1999 IEEE, vol. 1, pp. 431-439.
- [40] Hyosung Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, and Jaeho Choi, "Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 17, 2002, pp. 701-710.

- [41] S. Karimi, P. Poure, and S. Saadate, "Reference current generation without PLL for shunt active filter under distorted and unbalanced conditions," *Industrial Electronics*, 2008. ISIE 2008. IEEE International Symposium on, pp. 363-368.
- [42] J.F. Petit, G. Robles, and H. Amaris, "Current Reference Control for Shunt Active Power Filters Under Nonsinusoidal Voltage Conditions," *Power Delivery*, IEEE Transactions on, vol. 22, 2007, pp. 2254-2261.
- [43] J.F. and Amaris, H. and Robles, G. Petit, "Estimación de la corriente de referencia de un filtro activo de potencia usando el filtro Kalman," *UIS Ingenierías*, vol. 7, 2008, pp. 83-84.
- [44] J.F. Petit, H. Amaris, and G. Robles, "Current Control Schemes for Shunt Active Filters: Predictive Algorithms," *Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2005/2006 IEEE PES, pp. 693-698.
- [45] B. Singh, J. Solanki, and V. Verma, "Neural Network Based Control of DSTATCOM with Rating Reduction for Three-Phase Four-Wire System," *Power Electronics and Drives Systems*, 2005. PEDS 2005. International Conference on, vol. 2, pp. 920-925.
- [46] S. Buso, L. Malesani, and P. Mattavelli, "Comparison of current control techniques for active filter applications," *Industrial Electronics*, IEEE Transactions on, vol. 45, 1998, pp. 722-729.
- [47] M.P. Kazmierkowski and L. Malesani, "Current control techniques for three-phase voltage-source PWM converters: a survey," *Industrial Electronics*, IEEE Transactions on, vol. 45, 1998, pp. 691-703.
- [48] J.F. and Amaris, H. and Robles, G. Petit, "Current control schemes for three-phase four-wire shunt active power filters: a comparative study," *Revista Facultad De Ingenieria Universidad De Antioquia*, vol. 52, 2010, pp. 206-214.
- [49] A. Zouidi, F. Fnaiech, and K. Al-Haddad, "Neural Network controlled three-phase three-wire shunt active Power Filter," *Industrial Electronics*, 2006 IEEE International Symposium on, vol. 1, pp. 5-10.
- [50] Yang Xiao ping, Zhong Yan ru, and Wang Yan, "A Novel Control Method for DSTATCOM Using Artificial Neural Network," *Power Electronics and Motion Control Conference*, 2006. IPEMC 2006. CES/IEEE 5th International, vol. 3, pp. 1-4.

8. CURRÍCULUM



María A. Mantilla Villalobos. Ingeniera Electrónica de la Universidad Industrial de Santander (UIS), 2008. Estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica de la UIS e investigadora del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL-UIS). Áreas de interés: Calidad de la energía eléctrica, Electrónica de potencia, Dispositivos *Custom Power*.



Johann F. Petit Suárez. Ingeniero Electricista UIS, 1997; Magíster en Potencia eléctrica y Especialista en Docencia Universitaria UIS, 2002; Doctor en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática por la Universidad Carlos III de Madrid-España, 2007. Profesor Asociado de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones de la UIS e investigador del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL-UIS). Áreas de interés: Calidad de la energía eléctrica, Electrónica de potencia, Dispositivos FACTS, Uso racional y eficiente de la energía.